

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО СПЛАВА 29НК ПРИ ЭШП С ПОРЦИОННЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ СЛИТКА

И. В. Протоковиллов, А. Т. Назарчук, Д. А. Петров, В. Б. Порохонько

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты изучения особенностей формирования структуры слитков прецизионного сплава 29НК, полученных способом электрошлакового переплава с порционным формированием. Слитки диаметром 84 и 120 мм выплавляли путем переплава расходоуемых электродов в камерной электрошлаковой печи в импульсном режиме, обеспечивающем периодичность процессов плавления и кристаллизации металла. Это достигалось за счет циклического изменения электрического напряжения на ванне от рабочих значений, до значений, при которых плавление электрода прекращалось. Показано, что рациональный выбор режимов электрического питания во время импульсов и пауз плавления металла позволяет сохранить устойчивость электрошлакового процесса и хорошее качество формирования боковой поверхности слитка. При этом открываются дополнительные возможности управления структурообразованием металла ЭШП с получением слитков с плотной структурой, без пористости, включений, крупных столбчатых кристаллов и зоны встречной кристаллизации по оси слитка. Библиогр. 8, табл. 1, ил. 4.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; прецизионные сплавы; ковар; слиток; порционное формирование; кристаллизация; макроструктура

Сплав 29НК (ковар) относится к классу прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) и имеет следующий химический состав, мас. %: Fe — основа; Ni — 28,5...29,5; Co — 17,0...18,0 [1–3]. Его ТКЛР близок к ТКЛР стекла и керамики, при этом сплав отличается высокой адгезией к расплавленному стеклу и поэтому широко используется для изготовления вакуумно-плотных электрических выводов, проходящих через стекло и керамику.

Применение сплавов такого типа в электровакуумной технике и электронике связано с обеспечением строго заданных физических свойств металла. Поэтому к ним предъявляются повышенные требования по химическому составу, однородности, чистоте (отсутствие вредных примесей и включений).

Свойства металла, определяющие качество продукции, достигаются, прежде всего, за счет обеспечения химической и структурной однородности исходного слитка. В слитках прецизионных сплавов ЭШП различные формы химической неоднородности в большей или меньшей степени связаны с дендритной ликвацией [4]. Поэтому актуальной задачей при выплавке прецизионных сплавов является поиск способов ее снижения.

Образование в металле слитков ЭШП дефектов ликвационного характера следует рассматривать во взаимосвязи с условиями формирования их

структуры при кристаллизации, зависящими от следующих основных факторов [5–7]:

скорости переплава;

условий охлаждения жидкой металлической ванны и температурного градиента на фронте затвердевания;

образования перед фронтом затвердевания двухфазной зоны, ширина которой определяется химическим составом и свойствами сплава;

структуры и интенсивности гидродинамических течений в ванне и двухфазной зоне;

характера передачи тепла металлической ванне шлаком и каплями жидкого металла.

Приведенные выше факторы определяют глубину и форму жидкой металлической ванны, а следовательно и теплофизические условия формирования структуры металла слитка.

Наиболее благоприятные условия, с точки зрения структурообразования металла и снижения ликвационных процессов, создаются при поддержании в процессе ЭШП неглубокой жидкой металлической ванны с плоским фронтом кристаллизации. Однако при классической схеме ЭШП не всегда удается получить желаемую структуру металла при сохранении стабильности электрошлакового процесса и качественного формирования боковой поверхности слитка. Так, уменьшение скорости переплава, приводящее к уменьшению глубины металлической ванны и улучшению

структуры и однородности металла, одновременно приводит к недопустимому ухудшению формирования поверхности слитка.

В связи с этим практический интерес представляет исследование процесса ЭШП, который ведется в импульсном режиме с послойным формированием слитка.

Как известно, температуру шлаковой ванны можно изменять в широких пределах путем регулирования электрического напряжения на ней. По сути нижний предел температуры шлаковой ванны ограничен температурой затвердевания флюса, а верхний — закипания.

Температура плавления большинства флюсов для ЭШП сталей и сплавов на основе никеля и кобальта находится в пределах 1100...1400 °С, т. е. существенно ниже температуры плавления переплавляемого металла [8]. Это дает возможность, снижая напряжение на ванне в процессе ЭШП ниже определенного уровня, создавать такие условия, при которых будет поддерживаться жидкая электропроводная шлаковая ванна, а расходующий электрод плавиться не будет. За счет этого, циклически изменяя напряжение на ванне и соответствующим образом регулируя скорость подачи расходующего электрода, можно обеспечить периодичность плавления электрода и послойное формирование металла слитка.

Следует подчеркнуть, что современные тиристорные регуляторы с рабочими токами в десятки килоампер позволяют в процессе ЭШП изменять в широких пределах и по заданной программе напряжение на ванне и вводимую мощность, расширяя тем самым возможности управления процессом плавки и кристаллизацией слитка.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании технологических и металлургических особенностей процесса ЭШП прецизионного сплава 29НК с периодическим плавлением расходующего электрода и порционным (послойным) формированием слитка и изучении закономерностей структурообразования выплавленного металла.

Основными параметрами, определяющими порционное формирование слитка ЭШП, являются объем отдельных порций наплавленного металла и продолжительность выдержки, обеспечивающей полную или частичную кристаллизацию ранее расплавленной порции. В свою очередь первый параметр задается скоростью плавки и продолжительностью соответствующих периодов (импульсов) электрического питания, второй — продолжительностью периодов снижения напряжения на ванне (пауз плавления электрода) и режимами подогрева шлаковой ванны в эти периоды времени.

Одной из важных задач при порционном формировании слитка ЭШП является обеспечение надежного соединения отдельных порций металла без каких-либо дефектов в зоне сплавления. Свойства этой зоны в значительной мере определяются температурными режимами шлаковой ванны при паузах плавления электрода, а также переходными процессами в периоды между паузами и импульсами плавления. При этом следует учитывать, что при наплавлении очередной порции металла происходит термоциклическое воздействие на ранее наплавленные объемы металла с их частичным расплавлением и последующей перекристаллизацией.

В целом для обеспечения требуемых свойств переходной зоны желательнее, чтобы в процессе порционного переплава на поверхности формирующегося слитка все время оставался слой жидкого металла. Это достигается выбором продолжительности пауз плавления электрода и температуры подогрева шлаковой ванны в эти периоды.

При выборе объема отдельных порций наплавленного металла следует исходить из условий структурообразования металла и технико-экономических показателей процесса переплава. При чрезмерно большом объеме отдельных порций металла характер структурообразования в пределах каждого наплавленного слоя может ухудшаться с формированием крупных столбчатых кристаллов, ориентированных в направлении теплоотвода. В свою очередь уменьшение объема отдельных порций металла ниже определенного значения также нецелесообразно, так как оно не приводит к заметному улучшению качества металла, однако существенно снижает производительность процесса переплава. В целом высоту отдельных порций металла можно рассматривать как функцию от диаметра слитка.

С учетом изложенных выше положений были проведены экспериментальные исследования процесса ЭШП с порционным формированием слитков сплава 29НК диаметрами 84 и 120 мм. Плавки осуществляли в печи камерного типа в атмосфере аргона с использованием солевого фторидно-хлоридного флюса.

Плавки проводили следующим образом. После наведения шлаковой ванны и выхода на заданные электрические режимы включали аппаратуру управления, изменяющую по заданной программе напряжение в процессе ЭШП. После расплавления порции электродного металла заданного объема напряжение на ванне снижалось до значений, при которых прекращалось плавление электродного металла (7,5...9,0 В). Одновременно прекращали подачу расходующего электрода. Шлаковую ванну в этот период поддерживали в жидком состоянии

за счет ее подогрева электрическим током, величина которого уменьшалась пропорционально электрическому напряжению на ванне и увеличению сопротивления межэлектродного промежутка. В экспериментах периоды пауз плавления электрода составляли 180 и 300 с. Затем электрическое напряжение на ванне увеличивали до рабочего значения (37...38 В), осуществляли подачу электрода и повторяли описанные выше циклы (рис. 1). Тем самым обеспечивалась периодичность процессов плавления электрода и кристаллизации металла по высоте слитка.

Изменение напряжения в процессе переплава происходило автоматически за счет программируемого логического модуля и тиристорного регулятора, расположенного в первичной цепи силового трансформатора ТШП 10000/1. Изменение скорости подачи расходуемого электрода выполняли в ручном режиме. Режимы плавок приведены в таблице. Внешний вид, макроструктура и схема кристаллизации выплавленных слитков показаны на рис. 2–4.

Слиток 1 выплавлен при продолжительности импульсов и пауз плавления электрода 60 и 180 с соответственно. Процесс плавки проходил стабильно. Слиток характеризовался хорошим формированием боковой поверхности, на которой четко определялись шесть слоев кристаллизации (рис. 2, а). Высота отдельного наплавленного слоя составляла в среднем 33 мм. При переходе от слоя к слою на поверхности слитка имелись незначительные пережимы, глубина которых не превышала 1 мм.

Макроструктура слитка, за исключением его головной части, плотная, без пор, шлаковых включений, несплавлений и прочих дефектов. Она характеризуется наличием преимущественно столбчатых кристаллов (рис. 2, в), которые в придонной (1) и осевой (2) частях слитка ориентированы вертикально, а возле боковой стенки (3) — горизонтально. При этом ширина зоны горизонтально ориентированных кристаллов циклически изменяется по высоте слитка, что является характерным признаком его порционного формирования. Эта зона формируется во время пауз электропитания в условиях интенсивного охлаждения металла стенками кристаллизатора. Четко выраженных границ

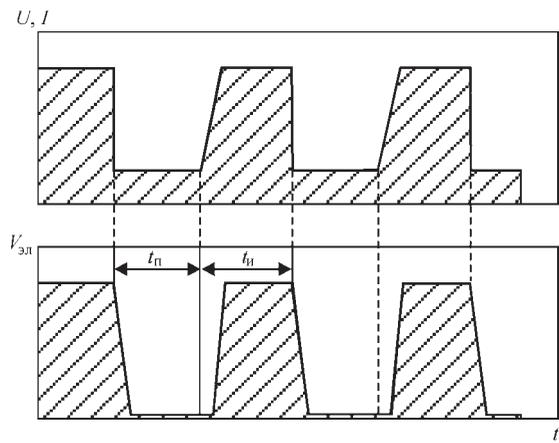


Рис. 1. Условная циклограмма изменения напряжения (U), тока (I) и скорости подачи электрода ($V_{эл}$) в процессе плавки: $t_{н}$, $t_{п}$ — продолжительности импульсов и пауз плавления электрода соответственно

раздела между слоями кристаллизации не наблюдается. Необходимо обратить внимание на отсутствие зоны слабины по оси слитка характерной для слитков ЭШП малого диаметра. Участок 4 в головной части слитка характеризуется наличием усадочной раковины на глубине до 15 мм, что свидетельствует о необходимости тщательного соблюдения режимов ее выведения на заключительном этапе плавки.

При выплавке слитка 2 продолжительность периодов плавления электрода была уменьшена до 33 с при паузах плавления составляющих 180 с (таблица). Высота отдельных порций наплавленного металла в данном случае составляла около 20 мм. Выплавленный слиток имел хорошее формирование боковой поверхности с незначительными пережимами в местах перехода от слоя к слою (рис. 3, а).

Макроструктура металла плотная, состоит из различных зон, образование которых обусловлено порционным плавлением и кристаллизацией металла с возможностью частичного подплавления, а также перекристаллизацией отдельных его объемов.

По высоте слитка (рис. 3, в) четко проявляются горизонтальные участки послойного структурообразования, состоящие из зон вертикально ориентированных кристаллов (2), чередующихся с участками с мелкозернистой равноосной структурой (3). Толщина этих мелкокристаллических слоев не-

Режимы выплавки слитков сплава 29НК										
Номер плавки/слитка	Диаметр, мм		Продолжительность, с		Скорость подачи электрода, м/ч		Напряжение, В		Ток, А	
	электрода	слитка	импульса	паузы	импульс	пауза	импульс	пауза	импульс	пауза
1	50	84	60	180	3,3	0	38	7,5	3200...3500	300...500
2	50	84	33	180	3,5	0	38	7,5	3500...4000	300...500
3	80	120	70	300	2,4	0	37	9,0	4500...5500	850...1000

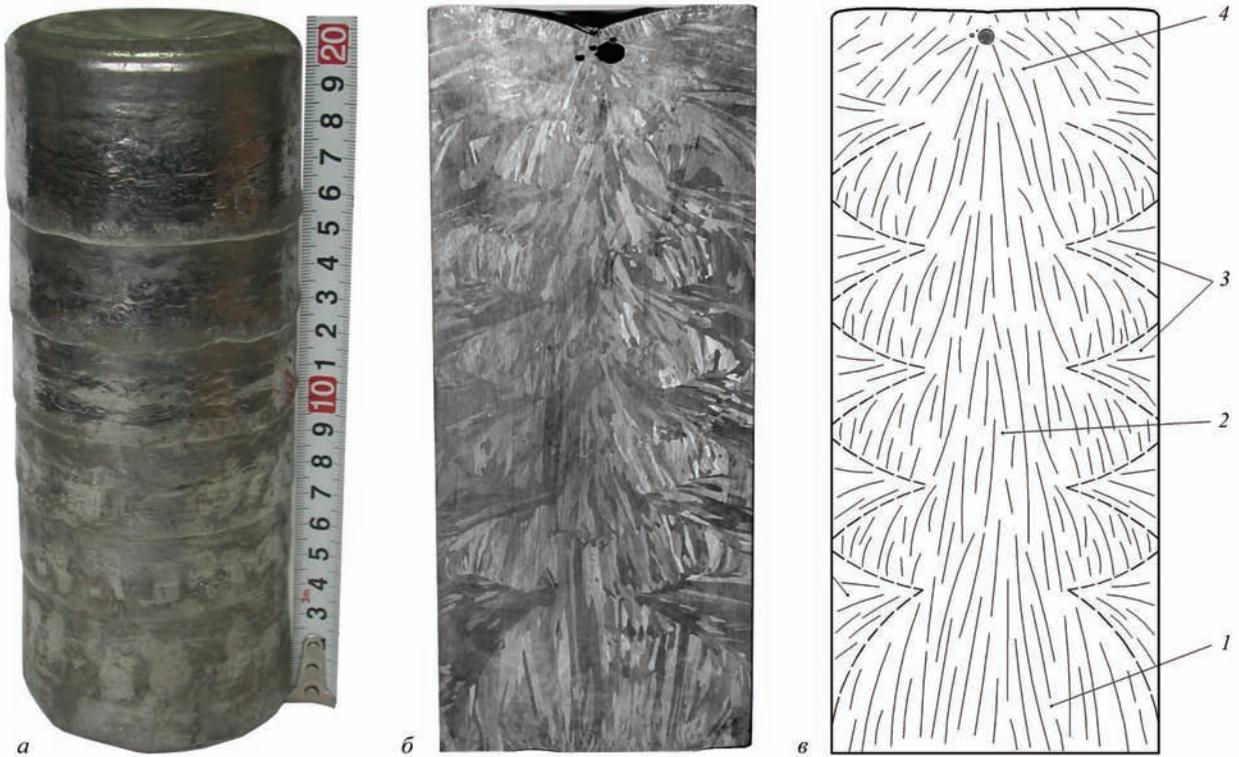


Рис. 2. Внешний вид (а), макроструктура (б) и схема кристаллизации (в) слитка сплава 29НК (плавка 1): 1 — придонная зона вертикально ориентированных кристаллов; 2 — центральная (осевая) зона вертикально ориентированных кристаллов; 3 — зоны горизонтально ориентированных кристаллитов у боковой поверхности слитка; 4 — зона в головной части слитка

сколько увеличивается по высоте слитка и стабилизируется на высоте равной его диаметру. Дисперсность структуры участков столбчатых кристаллов 2, за исключением придонной зоны 1, существен-



Рис. 3. Внешний вид (а), макроструктура (б) и схема кристаллизации (в) слитка сплава 29НК (плавка 2): 1 — придонная зона вертикально ориентированных кристаллов; 2 — зоны вертикально ориентированных кристаллов в центральной части слитка; 3 — зоны с мелкозернистой равноосной структурой; 4 — зона горизонтально ориентированных кристаллитов у боковой поверхности слитка; 5 — зона разориентированных кристаллов в головной части слитка



Рис. 4. Внешний вид (а), макроструктура (б) и схема кристаллизации (в) слитка сплава 29НК (плавка 3): 1 — зоны вертикально ориентированных кристаллов; 2 — зона горизонтально ориентированных кристаллов; 3 — линии сплавления

но выше, чем в слитке 1. У боковых поверхностей слитка сформирована зона 4 с горизонтальной ориентацией кристаллов, ширина и дисперсность которой мало изменяется по высоте слитка. Головная часть слитка 5 характеризуется разориентированной структурой без усадочной пористости.

В целом дисперсность структуры слитка 2 значительно выше, чем у аналогичных слитков, полученных по традиционной технологии ЭШП.

Слиток 3 диаметром 120 мм выплавлен при продолжительности импульсов и пауз плавления электрода 70 и 300 с соответственно (см. таблицу). Поверхность слитка сформирована хорошо, глубина характерных пережимов на его поверхности не превышает 2 мм (рис. 4, а). Макроструктура металла плотная, каких-либо дефектов в поле макрощлифа не обнаружено (рис. 4, б). В центральной части слитка кристаллы ориентированы преимущественно вертикально, периферийные зоны (около боковой поверхности) характеризуются ростом кристаллов, направленных к центру слитка. Дисперсность столбчатых кристаллов в центральной части достаточно высока, «прорастания» кристаллов от слоя к слою не наблюдается. Границы между отдельными слоями кристаллизации выявляются четко (на рис. 4, в показаны условно в виде черных линий 3). При этом следует отметить отсутствие каких-либо дефектов (микропор, шлаковых включений и пр.) по зонам сплавления. Тем не менее наличие выраженных границ раздела между отдельными порциями наплавленного металла носит, скорее, негативный характер, так как может приводить к анизотропии свойств металла в этих зонах.

Анализ структуры выплавленных слитков показал ряд положительных эффектов, обусловлен-

ных порционным плавлением и затвердеванием металла ЭШП. Все слитки имеют плотную структуру, без пористости и неметаллических включений, характеризуются отсутствием крупных столбчатых кристаллов и зоны встречной кристаллизации по оси слитка. При выборе рациональных режимов порционного формирования слитка «прорастания» кристаллов от слоя к слою не наблюдается, т. е. максимальная длина кристаллов ограничивается высотой отдельного наплавленного слоя. В целом дисперсность структуры металла выплавленных слитков сплава 29НК существенно выше, чем у аналогичных слитков традиционного ЭШП. Следовательно порционное тепловложение дает возможность, в той или иной степени, управлять процессом кристаллизации слитков ЭШП. Эффективность такого управления и выбор соответствующих режимов зависит, прежде всего, от химического состава сплава, размеров выплавленного слитка и условий его охлаждения.

Таким образом, проведенные эксперименты показали широкие возможности управления структурообразованием металла слитков при ЭШП за счет ведения процесса в импульсном режиме, обеспечивающем периодическое порционное плавление и затвердевание металла. При этом выбор рациональных режимов электрического питания во время импульсов и пауз плавления металла позволяет сохранить устойчивость электрошлакового процесса и хорошее качество формирования боковой поверхности слитка.

Дальнейшие работы будут направлены на изучение закономерностей структурообразования слитков большего диаметра, отработку режимов изменения параметров процесса на переходных

етапах и исследование свойств металла, включая зону сплавления.

Список литературы

1. *ГОСТ 10994–74*. Сплавы прецизионные. Марки. Межгосударственный стандарт.
2. Молотилов Б. В. (ред.). (1983) *Прецизионные сплавы*. Справочник. Москва, Металлургия.
3. Грицианов Ю. А., Путиццев Б. Н., Молотилов Б. В. (1975) *Металлургия прецизионных сплавов*. Москва, Металлургия.
4. Голиков И. Н., Масленков О. Б. (1977) *Дендритная ликвация в сталях и сплавах*. Москва, Металлургия.
5. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Шевцов В. Л. и др. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Патон Б. Е. (ред.). Киев, Наукова думка.
6. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Дяченко Д. М. (1990) *Качество электрошлакового металла*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
7. Митчелл А. (2008) Кристаллизация металла в процессах переплава. *Современная электрометаллургия*, **2**, 4–13.
8. (2016) *Выбор оптимального флюса — залог успеха при электрошлаковом переплаве*. https://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/632_RU.pdf

References

1. *GOST 10994–74*: Precision alloys. Grades. Intergovernmental standard [in Russian].
2. (1983) *Precision alloys*: Refer. Book. Ed. by B.V. Molotilov. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Gritsianov, Yu.A., Putimtsev, B.N., Molotilov, B.V. (1975) *Metallurgy of precision alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Golikov, I.N., Maslenkov, O.B. (1977) *Dendritic segregation in steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Shevtsov, V.L. et al. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Dyachenko, D.M. (1990) *Quality of electroslag metal*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Mitchell, A. (2008) Solidification of metal in remelting processes. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 3–11.
8. (2016) *Selection of optimal flux — guarantee of success in electroslag remelting*. https://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/632_RU.pdf

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО СПЛАВУ 29НК ПРИ ЕШП З ПОРЦІЙНИМ ФОРМУВАННЯМ ЗЛИВКА

І. В. Протоковілов, О. Т. Назарчук, Д. А. Петров, В. Б. Порохонько

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малеви́ча, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Наведено результати вивчення особливостей формування структури зливо́к прецизійного сплаву 29НК, отриманих способом електрошлакового переплаву з порційним формуванням. Зливки діаметром 84 і 120 мм виплавляли шляхом переплаву витратних електродів в камерній електрошлаковій печі в імпульсному режимі, що забезпечує періодичність процесів плавлення і кристалізації металу. Це досягалося за рахунок циклічної зміни електричної напруги на ванні від робочих значень, до значень, при яких плавлення електрода припинялось. Показано, що раціональний вибір режимів електричного живлення під час імпульсів і пауз плавлення металу дозволяє зберегти стабільність електрошлакового процесу і добру якість формування бокової поверхні зливка. При цьому відкриваються додаткові можливості управління структуроутворенням металу ЕШП з отриманням зливо́к з щільною структурою, без пористості, включень, великих стовпчастих кристалів і зони зустрічної кристалізації по осі зливка. Бібліогр. 8, табл. 1, іл. 4.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; прецизійні сплави; ковар; зливо́к; порційне формування; кристалізація; макроструктура

FEATURES OF STRUCTURE FORMATION IN THE PRECISION ALLOY 29NK IN ESR WITH A PORTION INGOT FORMATION

I.V. Protokovilov, A. T. Nazarchuk, D.A. Petrov, V.B. Porohonko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The results of studying the features of structure formation in the ingots of the precision alloy 29NK are given, produced by electroslag remelting with a portion formation. The ingots with a diameter of 84 and 120 mm were melted by remelting consumable electrodes in a chamber electroslag furnace in a pulsed mode, providing the periodicity of processes of melting and crystallization of metal. This was achieved due to cyclical variation of electric voltage on the pool from the operating values to the values at which the melting of the electrode stopped. It is shown that a rational choice of electric supply modes during pulses and pauses of metal melting allows maintaining the stability of electroslag process and a good quality of the formation of the side surface of the ingot. At the same time, additional possibilities are opened for controlling the structure formation in the ESR metal with producing ingots having a dense structure, without porosity, inclusions, large columnar crystals and a zone of counter crystallization along the axis of the ingot. Ref. 8, Tabl. 1, Fig. 4.

Key words: electroslag remelting; precision alloys; kovar; ingot; portion formation; crystallization; macrostructure

Поступила 12.11.2018